

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **041312**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.10.07

(21) Номер заявки
201992371

(22) Дата подачи заявки
2018.06.07

(51) Int. Cl. **G21B 1/05** (2006.01)
H05H 1/54 (2006.01)
H05H 1/16 (2006.01)

(54) СИСТЕМА УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ

(31) 62/516,508

(32) 2017.06.07

(33) US

(43) 2020.04.03

(86) PCT/US2018/036388

(87) WO 2018/226914 2018.12.13

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ЮНИВЕРСИТИ ОФ ВАШИНГТОН;
ЛОУРЕНС ЛИВЕРМОР НЭШНЛ
СЕКЬЮРИТИ, ЛЛС. (US)**

(72) Изобретатель:
**Шумлак Ури, Маклин Гарри С.,
Нельсон Брайан А. (US)**

(74) Представитель:
Нилова М.И. (RU)

(56) US-A1-20140247913
US-A-6051841

MAS DE LES VALLS, E. et al. "Lead-lithium eutectic material database for nuclear fusion technology" Journal of Nuclear Material, Volume 376, Issue 3, June 2008, PP 353-357
<URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311508000809>>, entire document.

(57) Пример системы удержания плазмы содержит внутренний электрод, имеющий закругленный первый конец, который расположен на продольной оси системы удержания плазмы, и внешний электрод, который по меньшей мере частично окружает внутренний электрод. Внешний электрод содержит твердую проводящую оболочку и электропроводный материал, расположенный на твердой проводящей оболочке и на продольной оси системы удержания плазмы. Электропроводный материал имеет точку плавления в пределах диапазона от 170 до 800°C при давлении в 1 атмосферу. В настоящей заявке также раскрыты другие схожие системы удержания плазмы и способы управления ими.

B1**041312****041312****B1**

Перекрестная ссылка на родственную заявку

Настоящая заявка испрашивает приоритет по предварительной патентной заявке США № 62/516,508, которая подана 7 июня 2017 и содержание которой полностью включено в настоящую заявку посредством ссылки.

Заявление об исследованиях или разработках, финансируемых из федерального бюджета

Настоящее изобретение было создано благодаря правительственной помощи в виде гранта № DE-AR0000571, предоставленного Министерством энергетики (Department of Energy, DOE). Правительство имеет определенные права на настоящее изобретение.

Предпосылки создания изобретения

Если в настоящей заявке не указано иное, то материалы, описанные в данном разделе, не являются известными из уровня техники по отношению к формуле изобретения в настоящей заявке и не признаются известными из уровня техники вследствие включения в данный раздел.

Ядерный синтез представляет собой процесс слияния двух ядер. При слиянии двух ядер элементов с атомными номерами, меньшими, чем у железа, происходит выделение энергии. Выделение энергии объясняется некоторой разностью масс между реагирующими компонентами с одной стороны и продуктами реакции синтеза с другой стороны и выражается формулой $\Delta E = \Delta mc^2$. Выделение энергии также зависит от притягивающего сильного ядерного взаимодействия между реагирующими ядрами, преодолевающего силы электростатического отталкивания между реагирующими ядрами. Реакция синтеза, требующая наименьшей температуры плазмы, происходит между дейтерием (ядрами водорода с одним протоном и одним нейтроном) и тритием (ядрами водорода, имеющими один протон и два нейтрона). Эта реакция дает на выходе ядро гелия-4 и нейтрон.

Один из подходов к достижению ядерного синтеза состоит в возбуждении газа, содержащего реагирующие компоненты синтеза, внутри реакционной камеры. Благодаря ионизации происходит преобразование возбужденного газа в плазму. Для достижения условий по температурам и плотностям, подходящим для синтеза, необходимо удерживать плазму.

Раскрытие сущности изобретения

Первый аспект настоящего изобретения относится к системе удержания плазмы, которая содержит внутренний электрод, имеющий закругленный первый конец, который расположен на продольной оси системы удержания плазмы, и внешний электрод, который по меньшей мере частично окружает внутренний электрод. Внешний электрод содержит твердую проводящую оболочку и электропроводный материал, размещенный на твердой проводящей оболочке и на продольной оси системы удержания плазмы. Электропроводный материал имеет точку плавления в пределах диапазона от 170 до 800°C при давлении в 1 атмосферу.

Второй аспект настоящего изобретения относится к способу управления системой удержания плазмы. Система удержания плазмы содержит внутренний электрод, имеющий закругленный первый конец, который расположен на продольной оси системы удержания плазмы, и внешний электрод, который по меньшей мере частично окружает внутренний электрод. Способ включает этап, на котором направляют газ в систему удержания плазмы и с помощью источника питания прикладывают напряжение между внутренним электродом и внешним электродом, преобразуя таким образом по меньшей мере часть газа в Z-пинч-плазму, которая протекает между (i) электропроводным материалом, расположенным на твердой проводящей оболочке внешнего электрода и на продольной оси системы удержания плазмы, и (ii) закругленным первым концом внутреннего электрода. Электропроводный материал имеет точку плавления в пределах диапазона от 170 до 800°C при давлении в 1 атмосферу. Способ также включает этап, на котором перемещают первую жидкую часть электропроводного материала наружу из системы удержания плазмы. Первая жидкая часть электропроводного материала нагревается под действием продуктов реакции Z-пинч-плазмы.

Третий аспект настоящего изобретения относится к системе удержания плазмы, которая содержит внутренний электрод, промежуточный электрод, который по меньшей мере частично окружает внутренний электрод, и внешний электрод, который по меньшей мере частично окружает промежуточный электрод. Внешний электрод содержит твердую проводящую оболочку и электропроводный материал, расположенный на твердой проводящей оболочке. Электропроводный материал имеет точку плавления в пределах диапазона от 180 до 800°C при давлении в 1 атмосферу.

Четвертый аспект настоящего изобретения относится к способу управления системой удержания плазмы. Система удержания плазмы содержит внутренний электрод, промежуточный электрод, который по меньшей мере частично окружает внутренний электрод, и внешний электрод, который по меньшей мере частично окружает промежуточный электрод. Способ включает этап, на котором направляют газ в область ускорения между внутренним электродом и промежуточным электродом и с помощью первого источника питания прикладывают напряжение между внутренним электродом и промежуточным электродом, преобразуя таким образом по меньшей мере часть газа в плазму, имеющую по существу кольцевое поперечное сечение и протекающую в осевом направлении внутри области ускорения в направлении первого конца внутреннего электрода и первого конца внешнего электрода. Способ также включает этап, на котором с помощью второго источника питания прикладывают напряжение между внутренним электродом

тродом и внешним электродом для создания Z-пинч-плазмы, которая протекает между (i) электропроводным материалом, расположенным на твердой проводящей оболочке внешнего электрода, и (ii) первым концом внутреннего электрода. Электропроводный материал имеет точку плавления в пределах диапазона от 180 до 800°C при давлении в 1 атмосферу. Способ также включает этап, на котором перемещают первую жидкую часть электропроводного материала наружу из системы удержания плазмы. Первая жидкая часть электропроводного материала нагревается под действием продуктов реакции Z-пинч-плазмы.

При использовании в данном документе термина "по существу" или "приблизительно" подразумевается, что названная характеристика, параметр или значение не обязательно должны быть достигнуты в точности, и могут иметь место отклонения или вариации, включая, например, допуски, ошибку измерения, пределы точности измерения и другие факторы, известные специалистам в данной области техники, причем их величина не мешает эффекту, достижение которого призвана обеспечить данная характеристика. В некоторых примерах, раскрытых в данном документе, "по существу" или "приблизительно" означает $\pm 5\%$ от названной величины.

Эти, а также другие аспекты, преимущества и альтернативы станут понятны специалистам в данной области техники при прочтении нижеследующего подробного описания со ссылками, там где это необходимо, на сопроводительные чертежи. Кроме того, следует понимать, что данный раздел "Раскрытие сущности изобретения" и другие описания и фигуры предназначены лишь для иллюстрации настоящего изобретения на примерах и, следовательно, возможны различные вариации.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 показан схематический вид в разрезе системы удержания плазмы согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 2 показан схематический вид в разрезе системы удержания плазмы согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 3 показана блок-схема способа управления системой удержания плазмы согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 4 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 5 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 6 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 7 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 8 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 9 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 10 показана блок-схема способа управления системой удержания плазмы согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 11 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 12 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 13 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 14 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 15 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 16 показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

Осуществление изобретения

В данном документе раскрыты различные варианты осуществления систем удержания плазмы и способов их использования. Раскрытые варианты осуществления, по сравнению с существующими системами и способами, обеспечивают возможность содействия повышению стабильности плазмы, повышению устойчивости срезанного плазменного потока, уменьшению радиуса Z-пинч-плазмы, повышению магнитных полей и/или повышению температуры плазмы. Некоторые из раскрытых вариантов осуществления также обеспечивают возможность независимого управления ускорением плазмы и сжатием плазмы.

Дополнительный признак некоторых из раскрытых вариантов осуществления включает один или более электродов с расположенным на них жидким электродным материалом (например, расположенным

на продольной оси системы удержания плазмы). Жидкий электродный материал способен поглощать и переносить тепло из плазменного разряда, обеспечивать экранирование от нейтронов, производить дополнительный тритий, обеспечивать дополнительную откачку на вакуум и обеспечивать среду для восстановления трития. Использование жидкого электродного материала может способствовать устранению проблем, таких как повреждение (твердых) электродов под действием тепла плазменного разряда. Также возможно осуществление циркуляции жидкого электродного материала внутри вакуумной камеры (например, поверх порога) таким образом, чтобы жидкий электродный материал имел азимутальную и/или осевую компоненту по отношению к его потоку внутри вакуумной камеры.

На фиг. 1 показан схематический вид в разрезе системы 100 удержания плазмы. Система 100 удержания плазмы содержит внутренний электрод 102, имеющий закругленный первый конец 104, который расположен на продольной оси 106 (например, на оси цилиндрической симметрии) системы 100 удержания плазмы. Система 100 удержания плазмы также содержит внешний электрод, который по меньшей мере частично окружает внутренний электрод 102. Внешний электрод содержит твердую проводящую оболочку 108 и электропроводный материал 110, расположенный на твердой проводящей оболочке 108 и на продольной оси 106 системы 100 удержания плазмы. Электропроводный материал 110 имеет точку плавления в пределах диапазона от 170 до 800°C (например, от 180 до 550°C) при давлении в 1 атмосферу. В различных примерах электропроводный материал 110 может присутствовать в форме эвтектик, сплавов или смесей одного или более из лития, свинца и олова.

Внутренний электрод 102 в целом имеет форму электропроводной оболочки (например, выполненной из нержавеющей стали, молибдена, вольфрама или меди), имеющей по существу цилиндрический корпус. Внутренний электрод 102 имеет первый конец 104 (например, закругленный конец) и противоположный второй конец 126 (например, по существу дискообразный конец). Первый конец 104 может быть выполнен, например, из материала на основе углерода, такого как графитовые или углеродные волокна, или одного или более из нержавеющей стали, молибдена, вольфрама и меди. В некоторых вариантах осуществления внутренний электрод 102 имеет покрытие на его внешней поверхности, которое содержит электропроводный материал, имеющий точку плавления в пределах диапазона от 180 до 800°C (например, от 180 до 550°C) при давлении в 1 атмосферу. В различных примерах электропроводный материал может присутствовать в виде эвтектик, сплавов или смесей одного или более из лития, свинца и олова. В качестве альтернативы, электропроводный материал может присутствовать в виде элементарного лития, свинца или олова.

Система 100 удержания плазмы также содержит подающий механизм 112 (например, электромеханическую систему), который выполнен с возможностью перемещения внутреннего электрода 102 внутрь и наружу из системы 100 удержания плазмы вдоль продольной оси 106. Во время работы внутренний электрод 102 может подвергаться эрозии под действием плазменного разряда, и подающий механизм 112 может приводиться в действие таким образом, чтобы подавать внутренний электрод 102 для поддержания зазора между внутренним электродом 102 и другими компонентами системы 100 удержания плазмы.

Система 100 удержания плазмы также содержит систему 114 охлаждения (например, теплообменник), которая выполнена с возможностью охлаждения внутреннего электрода 102 во время работы системы 100 удержания плазмы.

Внешний электрод в целом имеет форму электропроводной оболочки (например, из нержавеющей стали), имеющей по существу цилиндрический корпус. Твердая проводящая оболочка 108 внешнего электрода содержит твердую проводящую внешнюю оболочку 132 и твердую внутреннюю оболочку 134 (например, выполненную из электропроводного материала или материала с высоким удельным сопротивлением, такого как карбид кремния), которая расположена внутри твердой проводящей внешней оболочки 132 и находится в контакте с этой твердой проводящей внешней оболочкой 132. Более конкретно, твердая внутренняя оболочка 134 содержит осевую стенку 136, которая по меньшей мере частично окружает продольную ось 106 системы 100 удержания плазмы (например, частично окружает внутренний электрод 102), и радиальную стенку 138, которая соединяет осевую стенку 136 с твердой проводящей внешней оболочкой 132. Внешний электрод содержит первый конец 120 и противоположный второй конец 122. Закругленный первый конец 104 внутреннего электрода 102 расположен между первым концом 120 (например, по существу дискообразным концом) внешнего электрода и вторым концом 122 (например, по существу кольцевым концом) внешнего электрода. Радиальная стенка 138 и первый конец 120 внешнего электрода образуют резервуарную область 140 внутри камеры 100 удержания плазмы. Резервуарная область 140 служит в качестве резервуара для значительного количества электропроводного (например, жидкого) материала 110, который находится в камере 100 удержания плазмы. Как показано на фигуре, также возможно осуществление циркуляции электропроводного материала 110 поверх конца 148 осевой стенки 136 посредством насоса 150 и/или насоса 156, как более подробно описано ниже.

Внешний электрод (т.е. твердая проводящая оболочка 108 и электропроводный материал 110) окружает большую часть внутреннего электрода 102. Внутренний электрод 102 и внешний электрод могут быть концентрическими и обладать радиальной симметрией относительно продольной оси 106.

Система 100 удержания плазмы также содержит теплообменник 142, первое отверстие 144, выполненное с возможностью направления электропроводного материала 110 из теплообменника 142 в резер-

вуарную область 140, и второе отверстие 146, выполненное с возможностью направления электропроводного материала 110 из резервуарной области 140 к теплообменнику 142. Теплообменник 142 выполнен с возможностью приема, через второе отверстие 146, электропроводного материала 110, который нагрет внутри системы 100 удержания плазмы, извлечения тепла из электропроводного материала 110 и перемещения (например, накачки) электропроводного материала 110 обратно в резервуарную область 140 через первое отверстие 144 для повторного нагрева в результате реакций синтеза, которые происходят в системе 100 удержания плазмы. На фиг. 1 показано, что первое отверстие 144 находится выше второго отверстия 146, однако в других примерах второе отверстие 146 может быть расположено выше первого отверстия 144. Специалистам в данной области техники будет понятно, что в различных примерах отверстия 144 и 146 могут иметь различные относительные положения.

Как отмечено выше, осевая стенка 136 содержит конец 148, который обращен ко второму концу 122 внешнего электрода. Система 100 удержания плазмы также содержит первый насос 150, выполненный с возможностью перемещения электропроводного материала 110 из резервуарной области 140 в область 152, которая находится снаружи осевой стенки 136 и отделена от резервуарной области 140 радиальной стенкой 138. Первый насос 150 выполнен с возможностью перемещения электропроводного материала 110 поверх конца 148 осевой стенки 136 к области 154 внутри осевой стенки 136. Система 100 удержания плазмы также содержит второй насос 156, выполненный с возможностью перемещения электропроводного материала 110 из резервуарной области 140 к области 152, расположенной снаружи осевой стенки 136 и отделенной от резервуарной области 140 радиальной стенкой 138.

Система 100 удержания плазмы также содержит насос 170 (например, турбомолекулярный насос), выполненный с возможностью откачки воздуха из системы 100 удержания плазмы таким образом, чтобы базовое давление внутри системы 100 удержания плазмы находилось в пределах диапазона от 10^{-5} до 10^{-8} Торр (от $1,3 \times 10^{-3}$ до $1,3 \times 10^{-6}$ Па). Система 100 удержания плазмы также содержит одно или более газовых отверстий 116, выполненных с возможностью направления газа (например, трития, дейтерия, гелия-3, водорода, борсодержащего газа или борана) из источника 128 газа (например, емкости со сжатым газом) в область 121 ускорения, которая находится в радиальном направлении между внутренним электродом 102 и внешним электродом. Область 121 ускорения имеет по существу кольцевое поперечное сечение, определяемое формами внутреннего электрода 102 и твердой проводящей оболочки 108. Как показано на фиг. 1, указанные одно или более газовых отверстий 116 расположены в осевом направлении между первым концом 104 внутреннего электрода 102 и вторым концом 126 внутреннего электрода 102.

Система 100 удержания плазмы также содержит источник 118 питания, выполненный с возможностью приложения напряжения между внутренним электродом 102 и внешним электродом (например, твердой проводящей оболочкой 108). Источник 118 питания обычно имеет форму батареи конденсаторов, способной хранить, например, до 500 кДж или до 3-4 МДж. Положительный зажим источника 118 питания может быть соединен с внутренним электродом 102 или, в качестве альтернативы, с внешним электродом (например, с твердой проводящей оболочкой 108).

Система 100 удержания плазмы содержит область 124 собирания внутри внешнего электрода между первым концом 104 внутреннего электрода 102 и первым концом внешнего электрода. Система 100 удержания плазмы выполнена с возможностью удержания Z-пинч-плазмы внутри области 124 собирания, как описано ниже. Система 100 удержания плазмы также содержит изолятор 117 между вторым концом 122 внешнего электрода (например, твердой проводящей оболочки 117) и внутренним электродом 102 для поддержания электрической изоляции между внутренним электродом 102 и внешним электродом. Изолятор 117 (например, керамический материал) в целом имеет кольцевое поперечное сечение.

На фиг. 2 показан схематический вид в разрезе системы 200 удержания плазмы. Система 200 удержания плазмы может иметь любые из признаков системы 100 удержания плазмы, при различиях, описанных ниже. Одно различие между системой 100 удержания плазмы и системой 200 удержания плазмы состоит в наличии промежуточного электрода 205 в качестве части системы 200 удержания плазмы, как описано ниже. Система 200 удержания плазмы содержит внутренний электрод 202, промежуточный электрод 205 (например, по существу кольцевой электрод), который по меньшей мере частично окружает внутренний электрод 202, и внешний электрод, который по меньшей мере частично окружает промежуточный электрод 205. Внешний электрод содержит твердую проводящую оболочку 208 и электропроводный материал 210, расположенный на твердой проводящей оболочке 208 (например, на продольной оси 206). Электропроводный материал 210 имеет точку плавления в пределах диапазона от 180 до 800°C (например, от 180 до 550°C) при давлении в 1 атмосферу. В различных примерах электропроводный материал 210 может присутствовать в виде эвтектик, сплавов или смесей одного или более из лития, свинца и олова.

Внутренний электрод 202 в целом имеет форму электропроводной оболочки (например, выполненной из нержавеющей стали, молибдена, вольфрама или меди), имеющей по существу цилиндрический корпус. Внутренний электрод 202 содержит первый конец 204 (например, закругленный конец) и противоположный второй конец 226 (например, по существу дискообразный конец). Первый конец 204 может быть выполнен, например, из материала на основе углерода, такого как графитовые или углеродные волокна, или одного или более из нержавеющей стали, молибдена, вольфрама и меди. В некоторых вариантах осуществления внутренний электрод 202 имеет на его внешней поверхности покрытие, которое содержит электро-

проводный материал, имеющий точку плавления в пределах диапазона от 180 до 800°C (например, от 180 до 550°C) при давлении в 1 атмосферу. В различных примерах электропроводный материал может присутствовать в виде эвтектик, сплавов или смесей одного или более из лития, свинца и олова.

Промежуточный электрод 205 содержит первый конец 227 (например, по существу кольцевой конец) между первым концом 220 внешнего электрода и вторым концом 222 внешнего электрода. Промежуточный электрод 205 также содержит противоположный второй конец 223, который является по существу кольцевым. Система 200 удержания плазмы также содержит подающий механизм 212 (например, электромеханическую систему), который выполнен с возможностью перемещения внутреннего электрода 202 внутрь или наружу из системы 200 удержания плазмы вдоль продольной оси 206. Во время работы внутренний электрод 202 может подвергаться эрозии под действием плазменного разряда, и подающий механизм 212 может приводиться в действие таким образом, чтобы подавать внутренний электрод 202 для поддержания зазора между внутренним электродом 202 и другими компонентами системы 200 удержания плазмы.

Система 200 удержания плазмы также содержит систему 214 охлаждения (например, теплообменник), который выполнен с возможностью охлаждения внутреннего электрода 202 во время работы системы 200 удержания плазмы.

Внешний электрод в целом имеет форму электропроводной оболочки (например, из нержавеющей стали), имеющей по существу цилиндрический корпус. Твердая проводящая оболочка 208 внешнего электрода содержит твердую проводящую внешнюю оболочку 232 и твердую внутреннюю оболочку 234 (например, выполненную из электропроводного материала или материала с высоким удельным сопротивлением, такого как карбид кремния), которая расположена внутри твердой проводящей внешней оболочки 232 и находится в контакте с этой твердой проводящей внешней оболочкой 232. Более конкретно, твердая внутренняя оболочка 234 содержит осевую стенку 236, которая по меньшей мере частично окружает продольную ось 206 системы 200 удержания плазмы (например, частично окружает внутренний электрод 202), и радиальную стенку 238, которая соединяет осевую стенку 236 с твердой проводящей внешней оболочкой 232. Внешний электрод содержит первый конец 220 и противоположный второй конец 222. Закругленный первый конец 204 внутреннего электрода 202 расположен между первым концом 220 (например, по существу дискообразным концом) внешнего электрода и вторым концом 222 (например, по существу кольцевым концом) внешнего электрода. Радиальная стенка 238 и первый конец 220 внешнего электрода образуют резервуарную область 240 внутри камеры 200 удержания плазмы. Резервуарная область 240 служит в качестве резервуара для значительного количества электропроводного (например, жидкого) материала 210, который находится в камере 200 удержания плазмы. Как показано на фигуре, также возможно осуществление циркуляции электропроводного материала 210 поверх конца 248 осевой стенки 236 посредством насоса 250 и/или насоса 256, как более подробно описано ниже.

Внешний электрод (т.е. твердая проводящая оболочка 208 и электропроводный материал 210) окружают большую часть внутреннего электрода 202. Внутренний электрод 202 и внешний электрод могут быть концентрическими и обладать радиальной симметрией относительно продольной оси 206.

Система 200 удержания плазмы также содержит теплообменник 242, первое отверстие 244, выполненное с возможностью направления электропроводного материала 210 из теплообменника 242 в резервуарную область 240, и второе отверстие 246, выполненное с возможностью направления электропроводного материала 210 из резервуарной области 240 к теплообменнику 242. Теплообменник 242 выполнен с возможностью приема, через второе отверстие 246, электропроводного материала 210, который нагрет внутри системы 200 удержания плазмы, извлечения тепла из электропроводного материала 210 и перемещения (например, накачки) электропроводного материала 210 обратно в резервуарную область 240 через первое отверстие 244 для повторного нагрева в результате реакций синтеза, которые происходят в системе 200 удержания плазмы. На фиг. 2 показано, что первое отверстие 244 находится выше второго отверстия 246, однако в других примерах второе отверстие 246 может быть расположено выше первого отверстия 244. Специалистам в данной области техники будет понятно, что в различных примерах отверстия 244 и 246 могут иметь различные относительные расположения.

Как отмечено выше, осевая стенка 236 содержит конец 248, который обращен ко второму концу 222 внешнего электрода. Система 200 удержания плазмы также содержит первый насос 250, выполненный с возможностью перемещения электропроводного материала 210 из резервуарной области 240 в область 252, которая находится снаружи осевой стенки 236 и отделена от резервуарной области 240 радиальной стенкой 238. Насос 250 выполнен с возможностью перемещения электропроводного материала 210 поверх конца 248 осевой стенки 236 к области 254 внутри осевой стенки 236.

Система 200 удержания плазмы также содержит второй насос 256, выполненный с возможностью перемещения электропроводного материала 210 из резервуарной области 240 к области 252, расположенной снаружи осевой стенки 236 и отделенной от резервуарной области 240 радиальной стенкой 238.

Система 200 удержания плазмы также содержит насос 270 (например, турбомолекулярный насос), выполненный с возможностью откачки воздуха из системы 200 удержания плазмы таким образом, чтобы базовое давление внутри системы 200 удержания плазмы находилось в пределах диапазона от 10^{-5} до 10^{-8} Торр (от $1,3 \times 10^{-3}$ до $1,3 \times 10^{-6}$ Па).

Система 200 удержания плазмы также содержит одно или более газовых отверстий 216, выполненных с возможностью направления газа (например, трития, дейтерия, гелия-3, водорода, борсодержащего газа или борана) из источника 228 газа (например, емкости со сжатым газом) в область 218 ускорения, которая находится в радиальном направлении между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 205. Область 218 ускорения имеет по существу кольцевое поперечное сечение, определяемое формами внутреннего электрода 202 и промежуточного электрода 205. Как показано на фиг. 2, указанные одно или более газовых отверстий 216 расположены в осевом направлении между первым концом 204 внутреннего электрода 202 и вторым концом 226 внутреннего электрода 202.

Система 200 удержания плазмы также содержит источник 218 питания, выполненный с возможностью приложения напряжения между внутренним электродом 102 и промежуточным электродом 205. Источник 218 питания обычно имеет форму батареи конденсаторов, способной хранить, например, до 500 кДж или до 3-4 МДж. Положительный зажим источника 218 питания может быть соединен с внутренним электродом 102 или, в качестве альтернативы, с промежуточным электродом 205.

Система 200 удержания плазмы также содержит источник 219 питания, выполненный с возможностью приложения напряжения между внутренним электродом 102 и внешним электродом (например, твердой проводящей оболочкой 208). Источник 219 питания обычно имеет форму батареи конденсаторов, способной хранить, например, до 500 кДж или до 3-4 МДж. Положительный зажим источника 219 питания может быть соединен с внутренним электродом 102 или, в качестве альтернативы, с внешним электродом (например, с твердой проводящей оболочкой 208).

Система 200 удержания плазмы содержит область 224 собирания внутри внешнего электрода между первым концом 204 внутреннего электрода 202 и первым концом 220 внешнего электрода. Система 200 удержания плазмы выполнена с возможностью удержания Z-пинч-плазмы внутри области 224 собирания, как описано ниже.

Система 200 удержания плазмы также содержит изолятор 217 между вторым концом 223 промежуточного электрода 205 и внутренним электродом 202 для поддержания электрической изоляции между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 205. Изолятор 217 (например, керамический материал) в целом имеет кольцевое поперечное сечение.

Система 200 удержания плазмы также содержит изолятор 229 между твердой проводящей оболочкой 208 и промежуточным электродом 205 для поддержания изоляции между твердой проводящей оболочкой 208 и промежуточным электродом 205. Изолятор 229 (например, керамический материал) в целом имеет кольцевое поперечное сечение. На фиг. 3 показана блок-схема способа 300 управления системой удержания плазмы (например, системой 100 удержания плазмы). Система удержания плазмы содержит внутренний электрод, имеющий закругленный первый конец, который расположен на продольной оси системы удержания плазмы, и внешний электрод, который по меньшей мере частично окружает внутренний электрод. На фиг. 4-9 показаны некоторые из аспектов способа 300, описанных ниже. Хотя на фиг. 4-9 продольная ось 106 системы 100 удержания плазмы показана выровненной по горизонтали, на практике продольная ось 106 обычно будет выровнена по вертикали.

На этапе 302 способа 300 направляют газ в систему удержания плазмы.

Как показано, например, на фиг. 4, одно или более газовых отверстий 116 могут направлять газ 310 (например, одно или более трития, дейтерия, гелия-3, водорода, борсодержащего газа или борана) в область 121 ускорения между внутренним электродом 102 и внешним электродом (например, твердой проводящей оболочкой 108), который по существу окружает внутренний электрод 102. На фиг. 4 показано поступление начального количества газа 310 в область 121 ускорения, и на фиг. 5 показано последующее поступление дополнительного количества газа 310 в область 121 ускорения.

После протекания газа 310 давление газа вблизи указанных одного или более газовых отверстий 116 внутри области 121 ускорения может находиться в пределах диапазона от 1000 до 5800 Торр (от 133322 до 773267 Па) (например, от 5450 до 5550 Торр или от 726605 до 739937 Па) перед приложением напряжения между внутренним электродом 102 и внешним электродом (например, твердой проводящей оболочкой 108) с помощью источника 118 питания.

На этапе 304 способа 300 прикладывают с помощью источника питания напряжение между внутренним электродом и внешним электродом и таким образом преобразуют по меньшей мере часть газа в Z-пинч-плазму, которая протекает между (i) электропроводным материалом, расположенным на твердой проводящей оболочке внешнего электрода и на продольной оси системы удержания плазмы, и (ii) закругленным первым концом внутреннего электрода. Электропроводный материал имеет точку плавления в пределах диапазона от 170 до 800°C (например, от 180 до 550°C) при давлении в 1 атмосферу.

Согласно, например, фиг. 6-9, источник 118 питания может прикладывать напряжение между внутренним электродом 102 и внешним электродом (например, твердой проводящей оболочкой 108), преобразуя таким образом по меньшей мере часть газа 310 в Z-пинч-плазму 318 (см. фиг. 8-9), которая протекает между (i) электропроводным материалом 110, расположенным на твердой проводящей оболочке 108 внешнего электрода и на продольной оси 106 системы удержания плазмы, и (ii) закругленным первым концом 104 внутреннего электрода 102.

Например, источник 118 питания может прикладывать напряжение между внутренним электродом

102 и твердой проводящей оболочкой 108, преобразуя таким образом по меньшей мере часть газа 310 в плазму 316 (см. фиг. 6-9), имеющую по существу кольцевое поперечное сечение. Под действием магнитного поля, создаваемого своим собственным током, плазма 316 может протекать в осевом направлении внутри области 121 ускорения в направлении первого конца 104 внутреннего электрода 102 и первого конца 120 внешнего электрода, как последовательно показано на фиг. 6-9.

Как показано на фиг. 8 и 9, при выходе плазмы 316 за пределы области 121 ускорения, происходит образование Z-пинч-плазмы 318 в области 124 собирания внутри внешнего электрода между (i) электропроводным материалом 110, расположенным на твердой проводящей оболочке 108 внешнего электрода и на продольной оси 106 системы удержания плазмы, и (ii) закругленным первым концом 104 внутреннего электрода 102. Z-пинч-плазма 318 может образовывать срезанный осевой поток и иметь радиус от 0,1 до 3 мм, ионную температуру от 900 до 50000 эВ, электронную температуру более 500 эВ (например, до 50000 эВ), плотность ионов более 1×10^{23} ионов/м³, плотность электронов 1×10^{23} электронов/м³, магнитное поле свыше 8 Т, и/или она может быть стабильной в течение по меньшей мере 10 мкс.

На этапе 306 способа 300 перемещают первую жидкую часть электропроводного материала наружу из системы удержания плазмы. Первая жидкая часть электропроводного материала нагревается под действием продуктов реакции Z-пинч-плазмы (например, нейтронов и других энергетических частиц).

Теплообменник 142 может принимать (например, в результате накачки) через второе отверстие 146 часть электропроводного материала 110, который нагреет внутри системы 100 удержания плазмы, извлекать тепло из электропроводного материала 110 и перемещать (например, в результате накачки) электропроводный материал 110 обратно в резервуарную область 140 через первое отверстие 144 для повторного нагрева под действием реакций синтеза, которые происходят в системе 100 удержания плазмы. Перед созданием плазменного разряда внутри системы 100 удержания плазмы электропроводный материал 110 обычно нагревают (например, плавят) с переводом в жидкое состояние посредством нагревательного элемента (например, электрического), расположенного внутри системы 100 удержания плазмы.

Система 100 удержания плазмы также содержит подающий механизм 112 (например, электромеханическую систему), который может перемещать внутренний электрод 102 внутрь или наружу из системы 100 удержания плазмы вдоль продольной оси 106. Во время работы внутренний электрод 102 может подвергаться эрозии под действием плазменного разряда, и подающий механизм 112 может приводиться в действие таким образом, чтобы подавать внутренний электрод 102 для поддержания зазора между внутренним электродом 102 и другими компонентами системы 100 удержания плазмы. В дополнение, насосы 150 и 156 могут перемещать или осуществлять циркуляцию электропроводного материала 110 поверх внешнего электрода (например, поверх твердой проводящей оболочки 108) таким образом, чтобы разные части электропроводного материала 110 могли использоваться для поглощения тока и/или тепла (например, на продольной оси 106) из Z-пинч-плазмы с течением времени. Во время работы системы 100 удержания плазмы большая часть или весь электропроводный материал 110 будет в целом находиться в жидком состоянии.

В некоторых вариантах осуществления насосы 150 и 156 перемещают электропроводный материал 110 таким образом, что электропроводный материал 110, перемещаемый поверх внешнего электрода (например, поверх твердой проводящей оболочки 108), перемещается в азимутальном направлении (например, внутрь и/или наружу) и/или в осевом направлении относительно продольной оси 106 системы 100 удержания плазмы.

Более конкретно, насосы 150 или 156 могут перемещать электропроводный материал 110 из резервуарной области в область 152, которая расположена снаружи осевой стенки 136 и отделена от резервуарной области 140 радиальной стенкой 138. В дополнение, насосы 150 или 156 могут перемещать электропроводный материал 110 поверх конца 148 осевой стенки 136 к области 154 внутри осевой стенки 136 и обратно в направлении резервуарной области 140.

В различных вариантах осуществления напряжение, прикладываемое между внутренним электродом 102 и внешним электродом (например, твердой проводящей оболочкой 108), находится в пределах диапазона от 2 до 30 кВ. Напряжение, прикладываемое между внутренним электродом и внешним электродом (например, твердой проводящей оболочкой 108) может создавать радиальное электрическое поле в пределах диапазона от 30 до 500 кВ/м.

В некоторых вариантах осуществления Z-пинч-плазма 318 имеет радиус от 0,1 до 5 мм, ионную температуру от 900 до 50000 эВ и электронную температуру более 500 эВ (например, до 50000 эВ). Z-пинч-плазма 318 может иметь плотность ионов более 1×10^{23} ионов/см³ или плотность электронов более 1×10^{23} электронов/см³, и она может образовывать срезанный поток при напряженности магнитного поля свыше 8 Т. Z-пинч-плазма 318 может быть стабильной в течение по меньшей мере 10 мкс. В некоторых вариантах осуществления продукты реакции Z-пинч-плазмы 318 включают нейтроны. Таким образом, во время работы системы 100 удержания плазмы нейтроны и часть электропроводного материала 110 могут потребляться с образованием дополнительного тритиевого топлива для восстановления в теплообменнике 142. Реакционные свойства электропроводного материала 110 также могут служить для уменьшения базового давления внутри системы 100 удержания плазмы путем захвата частиц пара.

Некоторые варианты осуществления включают этап, на котором регулируют толщину электропроводного материала 110 на твердой проводящей оболочке 108 путем регулирования скорости, с которой теплообменник 142 перемещает электропроводный материал 110 в резервуарную область 140 из теплообменника 142, или путем регулирования скорости, с которой электропроводный материал 110 перемещается к теплообменнику 142 из резервуарной области 140. Повышение скорости, с которой электропроводный материал 110 втекает внутрь резервуарной области 140, будет в целом приводить к увеличению толщины электропроводного материала 110 на твердой проводящей оболочке 108. Повышение скорости, с которой электропроводный материал 110 вытекает из резервуарной области 140 к теплообменнику 142, будет в целом приводить к уменьшению толщины электропроводного материала 110 на твердой проводящей оболочке 108. На фиг. 10 показана блок-схема способа 1000 управления системой удержания плазмы (например, системой 200 удержания плазмы). Система удержания плазмы содержит внутренний электрод, промежуточный электрод, который по меньшей мере частично окружает внутренний электрод, и внешний электрод, который по меньшей мере частично окружает промежуточный электрод. На фиг. 11-16 показаны некоторые из аспектов способа 1000, описанных ниже. Хотя на фиг. 11-16 продольная ось 206 системы 200 удержания плазмы показана выровненной по горизонтали, на практике продольная ось 206 обычно будет выровнена по вертикали.

На этапе 1002 способа 100 направляют газ в область ускорения между внутренним электродом и промежуточным электродом.

Как показано, например, на фиг. 11, одно или более газовых отверстий 216 могут направлять газ 310 (например, одно или более из трития, дейтерия, гелия-3, водорода, борсодержащего газа или борана) в область 221 ускорения между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 204, который частично окружает внутренний электрод 202. На фиг. 11 показано поступление начального количества газа 310 в область 221 ускорения, и на фиг. 12 показано последующее поступление дополнительного количества газа 310 в область 221 ускорения.

После протекания газа 310 давление газа вблизи указанных одного или более газовых отверстий 216 внутри области 221 ускорения может находиться в пределах диапазона от 1000 до 5800 Торр (от 133322 до 773267 Па) (например, от 5450 до 5550 Торр или от 133322 до 773267 Па) перед приложением напряжения между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 205 с помощью источника 218 питания. На этапе 1004 способа 1000 с помощью источника питания прикладывают напряжение между внутренним электродом и промежуточным электродом, преобразуя таким образом по меньшей мере часть газа в плазму, имеющую по существу кольцевое поперечное сечение и протекающую в осевом направлении внутри области ускорения в направлении первого конца внутреннего электрода и первого конца внешнего электрода. Согласно, например, фиг. 11-14, источник 218 питания может прикладывать напряжение между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 205, преобразуя таким образом по меньшей мере часть газа 310 в плазму 316, имеющую по существу кольцевое поперечное сечение. Плазма 316 может протекать в осевом направлении внутри области 221 ускорения в направлении первого конца 204 внутреннего электрода 202 и первого конца внешнего электрода. Под действием магнитного поля, создаваемого своим собственным током, плазма 316 может протекать в осевом направлении внутри области 121 ускорения в направлении первого конца 204 внутреннего электрода 202 и первого конца 220 внешнего электрода, как последовательно показано на фиг. 11-14. На этапе 1006 способа 1000 с помощью второго источника питания прикладывают напряжение между внутренним электродом и внешним электродом для создания Z-пинч-плазмы, которая протекает между (i) электропроводным материалом, расположенным на твердой проводящей оболочке внешнего электрода, и (ii) первым концом внутреннего электрода. Электропроводный материал имеет точку плавления в пределах диапазона от 180 до 800°C (например, от 180 до 550°C) при давлении в 1 атмосферу.

Согласно, например, фиг. 15 и 16, источник 219 питания может прикладывать напряжение между внутренним электродом 202 и внешним электродом (например, твердой проводящей оболочкой 208) для создания Z-пинч-плазмы 318, которая протекает между (i) электропроводным материалом 210, расположенным на твердой проводящей оболочке 208 внешнего электрода, и (ii) первым концом 204 внутреннего электрода 202. Электропроводный материал 210 имеет точку плавления в пределах диапазона от 180 до 800°C (например, от 180 до 550°C) при давлении в 1 атмосферу.

Как показано на фиг. 15 и 16, при выходе плазмы 316 за пределы области 221 ускорения, происходит образование Z-пинч-плазмы 318 в области 224 собирания внутри внешнего электрода между (i) электропроводным материалом 210, расположенным на твердой проводящей оболочке 208 внешнего электрода и на продольной оси 206 системы 200 удержания плазмы, и (ii) закругленным первым концом 204 внутреннего электрода 202. Z-пинч-плазма 318 может образовывать срезанный осевой поток и иметь радиус от 0,1 до 5 мм, ионную температуру от 900 до 50000 эВ, электронную температуру более 500 эВ (например, до 50000 эВ), плотность ионов более 1×10^{23} ионов/м³, плотность электронов 1×10^{23} электронов/м³, магнитное поле свыше 8 Т, и/или она может быть стабильной в течение по меньшей мере 10 мкс.

На этапе 1008 способа 1000 перемещают первую жидкую часть электропроводного материала наружу из системы удержания плазмы. Первая жидкая часть электропроводного материала нагревается под действием продуктов реакции Z-пинч-плазмы.

Как показано, например, на фиг. 2, теплообменник 242 может принимать (например, в результате накачки) через второе отверстие 246 часть электропроводного материала 210, который нагрет внутри системы 200 удержания плазмы, извлекать тепло из электропроводного материала 210 и перемещать (например, в результате накачки) электропроводный материал 210 обратно в резервуарную область 240 через первое отверстие 244 для повторного нагрева под действием реакций синтеза, которые происходят в системе 200 удержания плазмы. Перед созданием плазменного разряда внутри системы 200 удержания плазмы электропроводный материал 210 обычно нагревают (например, плавят) с переводом в жидкое состояние с помощью нагревательного элемента (например, электрического), расположенного внутри системы 200 удержания плазмы. Система 200 удержания плазмы также содержит подающий механизм 212 (например, электромеханическую систему), который может перемещать внутренний электрод 202 внутрь или наружу из системы 200 удержания плазмы вдоль продольной оси 206. Во время работы внутреннего электрода 202 может подвергаться эрозии под действием плазменного разряда, и подающий механизм 212 может приводиться в действие таким образом, чтобы подавать внутренний электрод 202 для поддержания зазора между внутренним электродом 202 и другими компонентами системы 200 удержания плазмы. В дополнение, насосы 250 и 256 могут перемещать или осуществлять циркуляцию электропроводного материала 210 поверх внешнего электрода (например, поверх твердой проводящей оболочки 208) таким образом, чтобы разные части электропроводного материала 210 могли использоваться для поглощения тока и/или тепла (например, на продольной оси 206) из Z-пинч-плазмы 318 с течением времени. Во время работы системы 200 удержания плазмы большая часть или весь электропроводный материал 210 будет в целом находиться в жидком состоянии.

В некоторых вариантах осуществления насосы 250 и 256 перемещают электропроводный материал 210 таким образом, что этот электропроводный материал 210, перемещаемый поверх внешнего электрода (например, поверх твердой проводящей оболочки 208), перемещается в азимутальном направлении (например, внутрь и/или наружу) и/или в осевом направлении относительно продольной оси 206 системы 200.

Более конкретно, насосы 250 или 256 могут перемещать электропроводный материал 210 из резервуарной области 240 к области 252, которая расположена снаружи осевой стенки 236 и отделена от резервуарной области 240 радиальной стенкой 238. В дополнение, насосы 250 или 256 могут перемещать электропроводный материал 210 поверх конца 248 осевой стенки 236 к области 254 внутри осевой стенки 236 и обратно в направлении резервуарной области 240.

В различных вариантах осуществления напряжение, прикладываемое между внутренним электродом 202 и внешним электродом (например, твердой проводящей оболочкой 108), или между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 205, находится в пределах диапазона от 2 до 30 кВ. Прикладываемое напряжение может создавать электрическое поле в пределах диапазона от 30 до 500 кВ/м.

В некоторых вариантах осуществления Z-пинч-плазма 318 имеет радиус от 0,1 до 5 мм, ионную температуру от 900 до 50000 эВ и электронную температуру более 500 эВ (например, до 50000 эВ). Z-пинч-плазма 318 может иметь плотность ионов более 1×10^{23} ионов/см³ или плотность электронов более 1×10^{23} электронов/см³, и она может образовывать срезанный поток при магнитном поле свыше 8 Т. Z-пинч-плазма 318 может быть стабильной в течение по меньшей мере 10 мкс.

В некоторых вариантах осуществления продукты реакции Z-пинч-плазмы 318 включают нейтроны. Таким образом, во время работы системы 200 удержания плазмы нейтроны и часть электропроводного материала 210 могут потребляться с образованием дополнительного тритиевого топлива для восстановления в теплообменнике 242. Реакционные свойства электропроводного материала 210 также могут служить для уменьшения базового давления внутри системы 200 удержания плазмы путем захвата частиц пара.

Некоторые варианты осуществления включают регулирование толщины электропроводного материала 210 на твердой проводящей оболочке 208 путем регулирования скорости, с которой теплообменник 242 перемещает электропроводный материал 210 в резервуарную область 240 из теплообменника 242, или путем регулирования скорости, с которой электропроводный материал 210 перемещается к теплообменнику 242 из резервуарной области 240. Повышение скорости, с которой электропроводный материал 210 втекает в резервуарную область 240, будет в целом приводить к увеличению толщины электропроводного материала 210 на твердой проводящей оболочке 208. Повышение скорости, с которой электропроводный материал 210 вытекает из резервуарной области 240 к теплообменнику 242, будет в целом приводить к уменьшению толщины электропроводного материала 210 на твердой проводящей оболочке 208.

Хотя в данном документе были раскрыты различные примеры аспектов и вариантов осуществления, другие аспекты и варианты осуществления также будут понятны специалистам в данной области техники. Различные примеры аспектов и вариантов осуществления, раскрытые в данном документе, предназначены для иллюстративных целей и не предназначены для ограничения, а истинные объем и идея настоящего изобретения изложены в нижеследующей формуле изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система удержания плазмы, содержащая:
внутренний электрод;
промежуточный электрод, который по меньшей мере частично окружает внутренний электрод; и
внешний электрод, который по меньшей мере частично окружает промежуточный электрод и содержит:
твердую проводящую оболочку, содержащую:
твердую проводящую внешнюю оболочку; и
твердую внутреннюю оболочку, которая расположена внутри твердой проводящей внешней оболочки и находится в контакте с этой твердой проводящей внешней оболочкой,
причем твердая внутренняя оболочка содержит:
осевую стенку, которая по меньшей мере частично окружает продольную ось системы удержания плазмы; и
радиальную стенку, которая соединяет осевую стенку с твердой проводящей внешней оболочкой,
при этом радиальная стенка и первый конец внешнего электрода образуют резервуарную область,
электропроводный материал, расположенный на твердой проводящей оболочке и имеющий точку плавления в пределах диапазона от 180 до 800°C при давлении в 1 атмосферу, и
насосную систему, выполненную с возможностью осуществления циркуляции электропроводного материала поверх внешнего электрода при нахождении электропроводного материала в жидком состоянии.
2. Система удержания плазмы по п.1, также содержащая подающий механизм, который выполнен с возможностью перемещения внутреннего электрода вдоль продольной оси системы удержания плазмы.
3. Система удержания плазмы по п.1, также содержащая систему охлаждения, которая выполнена с возможностью охлаждения внутреннего электрода во время работы системы удержания плазмы.
4. Система удержания плазмы по п.1, также содержащая:
первый источник питания, выполненный с возможностью приложения напряжения между внутренним электродом и промежуточным электродом; и
второй источник питания, выполненный с возможностью приложения напряжения между внутренним электродом и внешним электродом.
5. Система удержания плазмы по п.1, в которой электропроводный материал содержит одно или более из лития, свинца и олова.
6. Система удержания плазмы по п.1, в котором внутренний электрод имеет первый конец, по меньшей мере частично окруженный внешним электродом, причем система удержания плазмы выполнена с возможностью удержания Z-пинч-плазмы между первым концом внутреннего электрода и электропроводным материалом.
7. Система удержания плазмы по п.1, которая также содержит:
теплообменник; и
первое отверстие, выполненное с возможностью направления электропроводного материала из теплообменника в резервуарную область.
8. Система удержания плазмы по п.1, в которой насосная система выполнена с возможностью осуществления циркуляции электропроводного материала таким образом, что движение электропроводного материала включает одну или более из таких компонент, как азимутальная компонента и осевая компонента, относительно продольной оси системы удержания плазмы.
9. Система удержания плазмы по п.1, в которой первый конец внутреннего электрода выполнен из графитовых или углеродных волокон.
10. Система удержания плазмы по п.1, которая также содержит одно или более газовых отверстий, выполненных с возможностью направлять газ в область ускорения между внутренним электродом и промежуточным электродом.
11. Система удержания плазмы по п.1, в которой внутренний электрод имеет первый конец, который по меньшей мере частично окружен внешним электродом.
12. Система удержания плазмы по п.11, в которой первый конец внутреннего электрода является закругленным.
13. Система удержания плазмы по п.1, также содержащая изолятор между вторым концом внешнего электрода и промежуточным электродом.
14. Система удержания плазмы по п.13, выполненная с возможностью удержания Z-пинч-плазмы между первым концом внутреннего электрода и электропроводным материалом на продольной оси системы удержания плазмы.
15. Система удержания плазмы по п.14, в которой Z-пинч-плазма образует осевой поток, который изменяется в радиальном направлении.
16. Система удержания плазмы по п.7, в которой осевая стенка содержит конец, который обращен ко второму концу внешнего электрода, а система удержания плазмы также содержит первый насос, вы-

полненный с возможностью перемещения электропроводного материала из резервуарной области к области, которая расположена снаружи осевой стенки и отделена от резервуарной области радиальной стенкой.

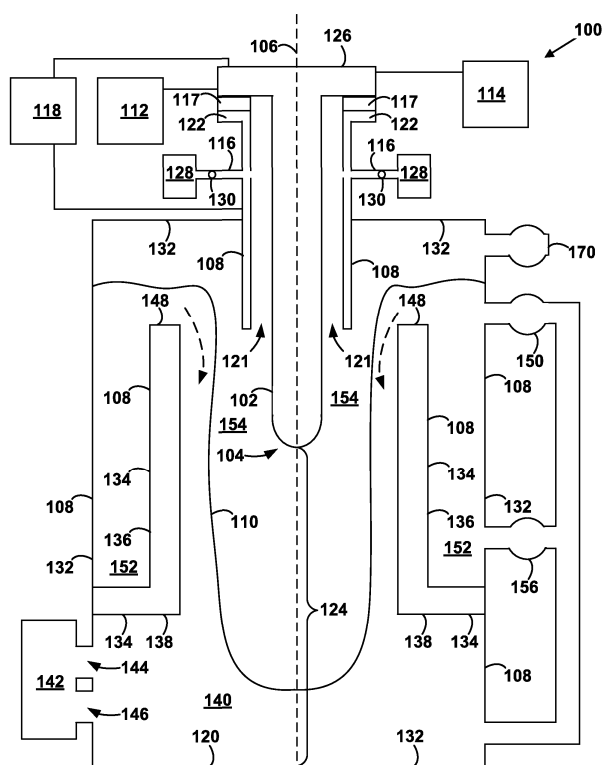
17. Система удержания плазмы по п.16, также содержащая:

второй насос, выполненный с возможностью перемещения электропроводного материала из резервуарной области к области, которая расположена снаружи осевой стенки и отделена от резервуарной области радиальной стенкой.

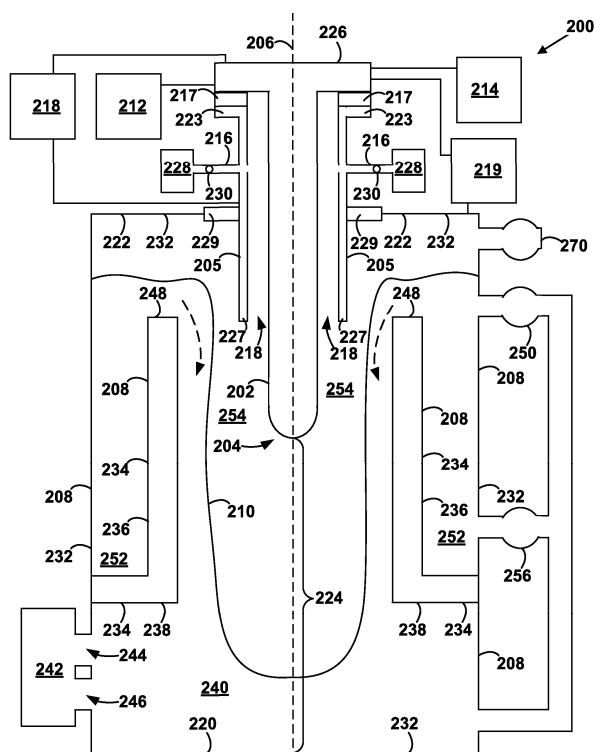
18. Система удержания плазмы по п.1, выполненная с возможностью обеспечения протекания тока между внутренним электродом и внешним электродом и через Z-пинч-плазму, и через электропроводный материал.

19. Система удержания плазмы по п.1, в которой промежуточный электрод образует полость, а внутренний электрод расположен по меньшей мере частично внутри указанной полости.

20. Система удержания плазмы по п.19, в которой внутренний электрод имеет первый конец, который по меньшей мере частично окружен внешним электродом.



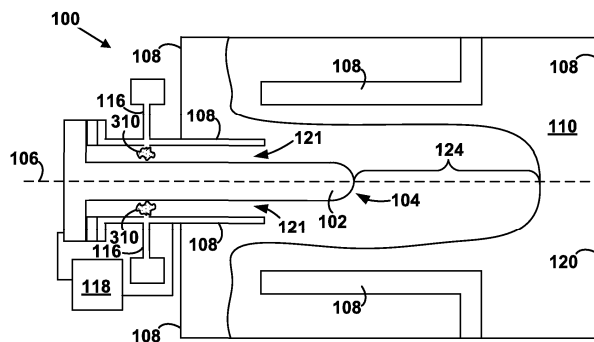
ФИГ. 1



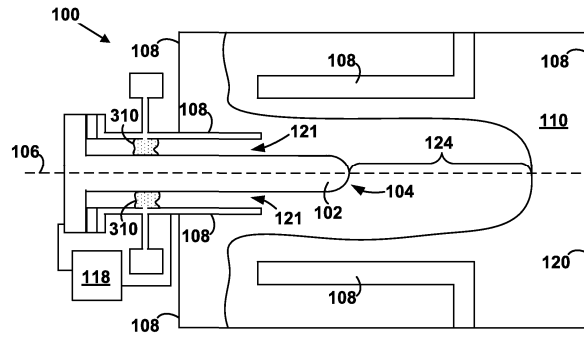
Фиг. 2



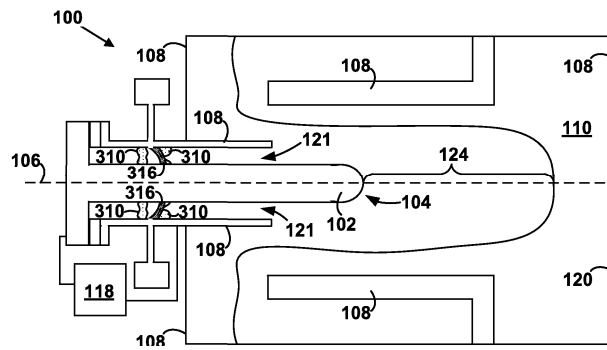
Фиг. 3



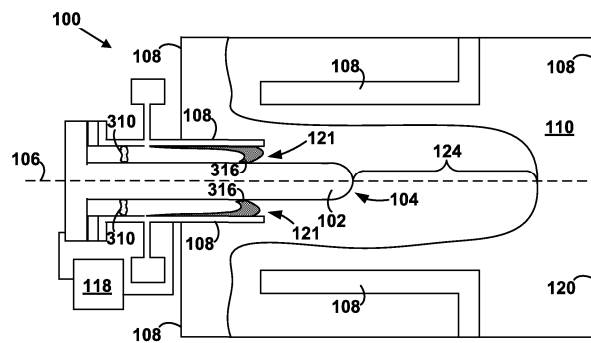
Фиг. 4



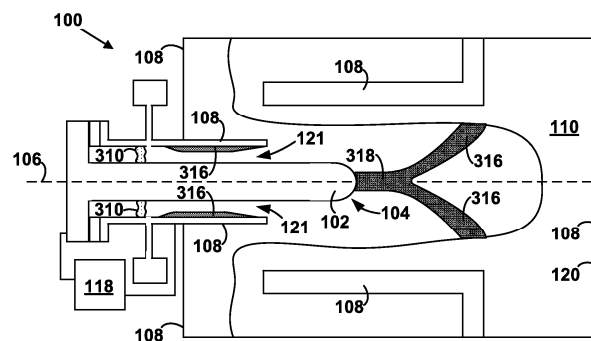
Фиг. 5



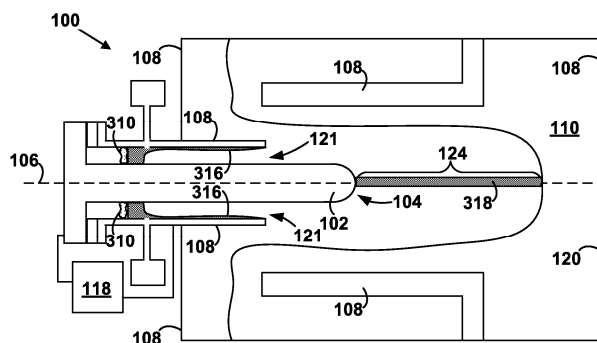
Фиг. 6



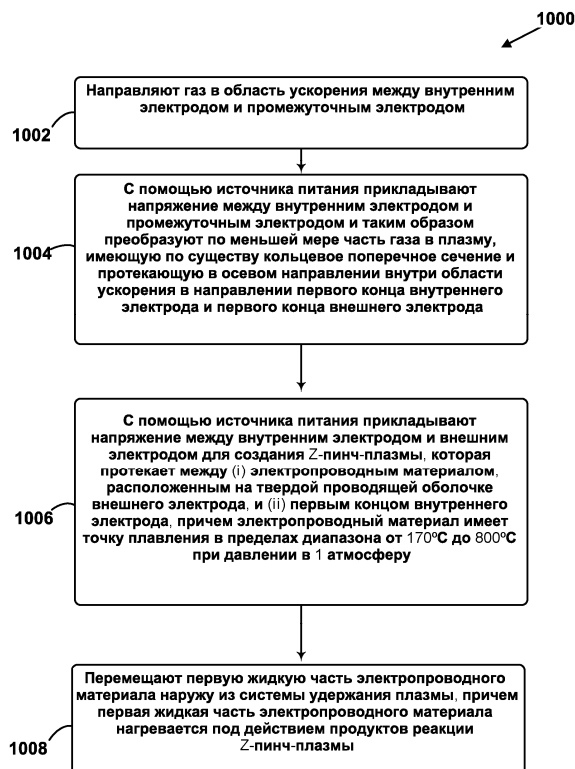
Фиг. 7



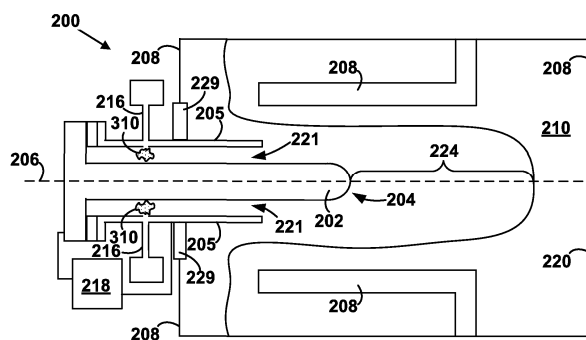
Фиг. 8



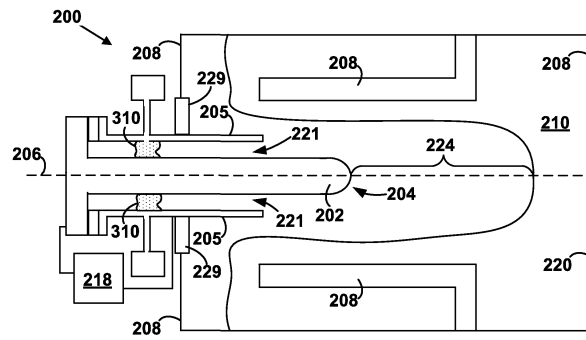
Фиг. 9



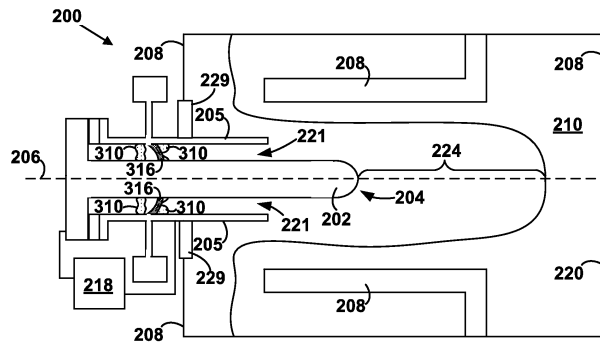
Фиг. 10



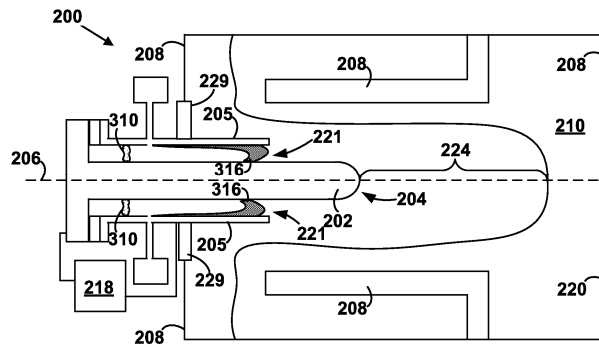
Фиг. 11



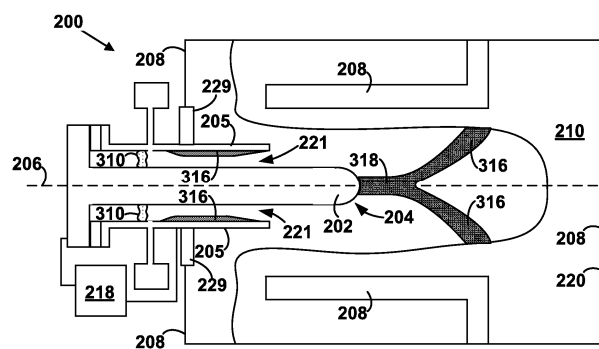
Фиг. 12



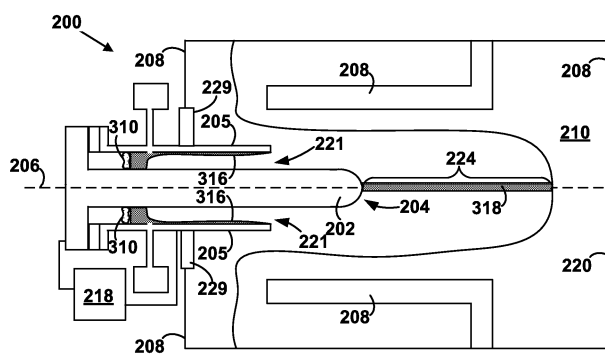
Фиг. 13



Фиг. 14



Фиг. 15



Фиг. 16

